

# 惠民凹陷辉绿岩席对下伏烃源岩热影响模型研究

王大勇<sup>1</sup>, 宋永臣<sup>\*1</sup>, 陆现彩<sup>2</sup>, 赵明龙<sup>1</sup>, 齐天<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 勘探发现渤海湾盆地惠民凹陷存在与火成岩席有关的油气藏. 基于两种不同的热传导模型, 数值模拟了该凹陷内一个孤立的辉绿岩席以及围岩的热演化, 定量分析了岩席对下伏围岩的热影响. 模拟结果表明: 围岩孔隙水的汽化作用是影响岩浆-围岩热传输的重要因素, 在孔隙水汽化的情况下, 围岩经历的峰值温度比简单热传导模型低 100 °C 左右; 在热接触变质形成的角岩带内出现镜质体反射率的异常低值, 无法通过常用公式计算围岩经历的峰值温度, 但依据爆炸古温度方法得到的结果与热传输模拟结果一致, 反映了该区域曾经历了高温(大于 450 °C)和高压环境.

**关键词:** 热传输模型; 热成熟度; 辉绿岩席; 镜质体反射率; 惠民凹陷

**中图分类号:** TE122 **文献标志码:** A

## 0 引言

惠民凹陷位于济阳拗陷的西北部, 是济阳拗陷最大的次级凹陷, 自第三纪以来有多期次岩浆作用. 岩浆活动使惠民凹陷地温梯度明显升高, 促进了沉积有机质的熟化作用, 加速了烃源岩的排烃和原油热裂解, 并形成多处与岩浆作用有关的油气藏<sup>[1]</sup>. 因此, 深入研究岩浆侵入体的热效应具有重要的勘探意义. 采用合理的热传输模型和数值模拟技术是定量研究侵入岩浆影响围岩热演化的有效手段<sup>[2~5]</sup>. 国内多位学者先后系统研究了惠民凹陷的岩石热物理属性和地温特征, 为定量分析惠民凹陷火成岩席对围岩的影响奠定了基础<sup>[6,7]</sup>. 2007年, 文献<sup>[5]</sup>建立了惠民凹陷辉绿岩席与下伏地层间热量传输的数学模型, 获得的模拟结果和镜质体反射率、围岩热变质的特征吻合较好, 但没有定量评估孔隙水汽化对侵入体相邻围岩热演化的影响程度和范围, 对角岩带镜质体反射率的可靠性亦未做深入讨论.

本文在前期研究基础上, 采用不同热传输模型重构惠民凹陷辉绿岩席下伏烃源岩的热演化规律, 定量分析孔隙水汽化对侵入体相邻围岩热演化的影响程度和范围, 并对角岩带镜质体反射率作为温标的有效性进行深入分析.

## 1 地质背景

惠民凹陷夏 38 井区辉绿岩席近水平展布, 围岩为沙河街组第三段中部泥质岩石, 走向 NNW-SSE, 岩席与围岩地层的交角约为 9°, 长约 7 km, 宽约 3 km, 分布面积约 20 km<sup>2</sup>, 厚度在 40~70 m, 平均厚度约 50 m<sup>[1]</sup>. 沙三段中部地层为一套深水湖相沉积的深灰色、黑色泥岩, 厚达 900 m, 均进入成熟、高成熟阶段, 是区内最重要的烃源岩层之一<sup>[8]</sup>.

该岩席在纵向上有轻微的岩性变化, 上部为橄榄辉绿岩, 中部为辉长-辉绿岩, 下部为辉绿岩<sup>[9]</sup>, 其 Ar-Ar 绝对年龄约为  $40 \times 10^6$  a. 李春

收稿日期: 2010-05-15; 修回日期: 2011-12-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41004031, 50736001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100041120039); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目.

作者简介: 王大勇(1978-), 男, 博士, 副教授; 宋永臣\*(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: songyc@dlut.edu.cn.

光<sup>[1]</sup>认为该岩席的初始侵入深度应在700~1600 m,作者结合邱楠生等<sup>[7]</sup>对该区的热史研究,可进一步确定侵入深度约为850 m,侵入时岩浆的温度约为1250℃<sup>[10]</sup>,围岩温度为44℃<sup>[5]</sup>.

钻孔X38、X39和X382揭示的岩席厚度分别为51.5、69.0和58.0 m,上下围岩均为灰质泥岩.围岩存在明显的烘烤变质现象,在近岩席区域为角岩带,见有多种热接触变质矿物,脉状与颗粒状黄铁矿较多;在角岩化带外侧则为黑色碳质泥岩带,该带的颜色明显深于角岩化带和正常泥岩,

其矿物成分和岩石结构构造均无明显变化,显微镜观察发现局部有重结晶形成的微晶碳酸盐矿物,黄铁矿含量略高,甚至出现黄铁矿微细脉,此外,岩石光片中可见较多的碳化点.邱隆伟等<sup>[9]</sup>、张映红等<sup>[11]</sup>和张学军在《胜利油田地质科学研究院报告》中系统描述了上述烘烤变质带的岩石学特征,岩席下伏围岩的岩性和镜质体反射率如表1所示<sup>[5]</sup>.另外,这3个钻孔揭示的岩席两侧烘烤变质带的厚度不尽相同,见表2,分别表现为上厚下薄、上薄下厚、上下等厚.

表1 岩席下伏岩层的热演化特征

Tab.1 Index of thermal evolution of the underlying host rocks of the sill

井号	现今埋深 h/m	岩性	反射率 R <sub>0</sub> /%	距岩席底面距离 l/m	峰值温度 1 <sup>1)</sup> /℃	峰值温度 2 <sup>2)</sup> /℃
X382	3 716.5	角岩化泥岩	3.74	3.5	320.9	530.0±40.0 <sup>3)</sup>
X382	3 722.0	碳质泥岩	4.70	9.0	350.0	600.0 <sup>4)</sup>
X382	3 725.5	碳质泥岩	3.20	12.5	300.9	500.0±40.0 <sup>3)</sup>
X382	3 730.0	碳质泥岩	2.99	17.0	292.2	490.0±40.0 <sup>3)</sup>
X382	3 732.0	碳质泥岩	2.60	19.0	274.4	455.0
X38	3 881.2	碳质泥岩(屑)	6.50	3.2	391.5	600.0 <sup>4)</sup>
X38	3 881.3	碳质泥岩(屑)	5.58	3.3	372.0	600.0 <sup>4)</sup>
X38	3 881.7	碳质泥岩(屑)	5.30	3.7	365.4	600.0 <sup>4)</sup>
X38	3 886.0	碳质泥岩(屑)	3.00	8.0	292.7	490±40.0 <sup>3)</sup>
X38	3 892.0	泥岩(屑)	2.15	14.0	250.1	400.0
X38	3 924.0	泥岩(屑)	1.15	46.0	170.0	315.0
X38	3 946.0	泥岩(屑)	1.18	68.0	173.3	318.0
X38	3 978.0	泥岩(屑)	1.09	100.0	163.2	310.0
X39	3 678.0	角岩化泥岩(屑)	2.98	3.0	292.0	490.0±40.0 <sup>3)</sup>
X39	3 684.0	角岩化泥岩(屑)	1.80	9.0	227.0	350.0
X39	3 720.0	泥岩(屑)	1.37	45.0	192.0	330.0
X39	3 750.0	泥岩(屑)	1.01	75.0	153.0	305.0

注:1)峰值温度1由公式  $t_p = (\ln R_0 + 1.19) / 0.00782$  求得(适用的温度范围通常认为不超过300.0℃);

2)峰值温度2由爆炸温度计算方法进行计算(可用范围通常为100.0~600.0℃)<sup>[12,13]</sup>;

3)表示在约500.0℃时,爆炸温度的不确定性为40.0℃;

4)当镜质体反射率大于4.5%时(对应峰值温度大于600.0℃),超过爆炸温度计算方法的应用范围,本文假设其对应峰值温度均为600.0℃

表2 岩席侵入体及围岩烘烤变质带的厚度

Tab.2 Thickness of the sill and its adjacent metamorphosed host rocks

井号	岩席厚度 t/m	上覆地层厚度		下伏地层厚度		A <sub>1</sub> : A <sub>2</sub>
		A <sub>1</sub> /m	B <sub>1</sub> /m	A <sub>2</sub> /m	B <sub>2</sub> /m	
X38	51.5	23	7	12.0	3	~2 : 1
X39	69.0	22	9	33.5	10	~2 : 3
X382	58.0	23	10	23.0	6	~1 : 1

注:A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>表示烘烤变质带厚度;B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>表示角岩化层厚度

## 2 热传输模型

作者在文献[5]中建立了描述惠民凹陷辉绿岩席向下伏围岩热传输的数学模型,方程如下:

$$K \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + A = c_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为温度(℃),K为热导率, $c_p$ 为等压比热容, $\rho$ 为密度,A为热传输介质内部(岩席和围岩)的产热或放热量的总和,主要包括熔融态岩浆的

结晶热和地层孔隙水的汽化热。由于在岩浆侵入阶段,下伏围岩的孔隙度很高,孔隙水的汽化至关重要。在建模时,忽略孔隙水汽化热的模型为简单热传导模型,反之则为复杂热传导模型<sup>[4]</sup>。

岩席上下两侧地层内的热传输形式通常存在明显不同。上覆地层可能发生孔隙水的对流运动,而在下伏地层一般不会发生,因此,岩席向两侧地层传输的热量会有所差异,岩席上下烘烤变质带的厚度通常不等。针对这一现象,Wang等<sup>[5]</sup>提出了设定岩席内部的模型边界(热源边界)的思路,该边界下的岩浆的热量只向下方传输,而以上的部分则只向上传输,认为在建立模型时,应根据岩席上下烘烤变质带的相对厚度来近似地分配岩席的总输出热量。本文将围岩内的热传输边界置于距岩席底面10倍于岩席厚度处,即假定该边界处不受岩席影响。综上所述,岩席热量向下伏围岩传输的地质模型如图1所示。关于惠民凹陷夏38井区辉绿岩席和围岩的热物理参数,作者在文献<sup>[5]</sup>中已做过详细的报道。为了保证计算的稳定性,本文采用隐式差分格式进行计算<sup>[2]</sup>。

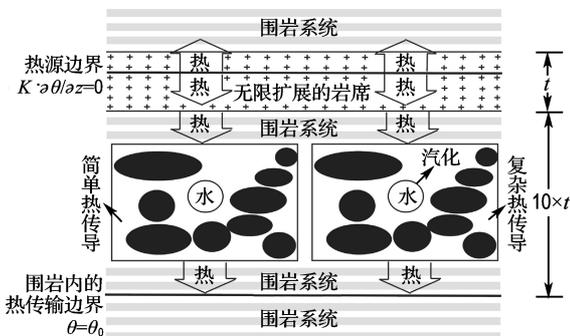


图1 岩席热量在下伏围岩中的传输

Fig.1 Heat transfer from the sill into its underlying host rocks

### 3 模拟结果

#### 3.1 X38井

X38井岩席下伏地层经历的峰值温度见图2。根据简单热传导模型计算的峰值温度 $\theta_p$ 明显高于根据镜质体反射率计算的结果。在相同的边界条件下,简单热传导模型的模拟温度高出复杂

热传导模型100℃。

特别地,烘烤变质带确定模型边界的复杂热传导模型的模拟结果显示,在距岩席距离小于10m(现今埋深3878~3888m)的地层,经历的峰值温度高于300℃(孔隙水沸点温度)。在距岩席距离大于32m(现今埋深大于3910m)的地层区域,模拟温度低于当今地层的埋藏温度,岩浆的热影响被现今埋藏温度掩盖。在碳质泥岩带且镜质体反射率高于3.0%的围岩区域( $\theta_p$ 大于300℃),尽管镜质体反射率随着 $\theta_p$ 升高而增加,但无论是Barker等<sup>[15]</sup>提出的公式还是Bostick等<sup>[12,13]</sup>的爆炸古温度计算方法,都不能可靠地计算围岩的峰值温度。

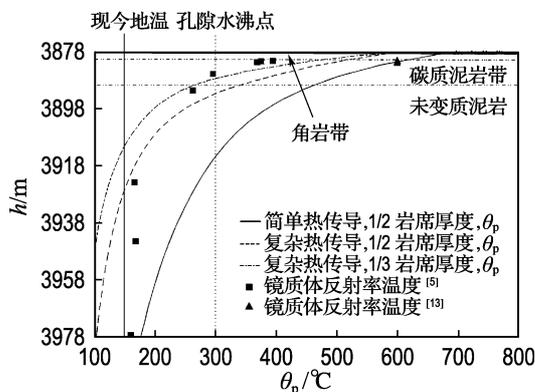


图2 X38井岩席下伏围岩的峰值温度

(生油窗温度下限约为100℃<sup>[14]</sup>)

Fig.2 Predicted peak temperature of the underlying host rocks at Well X38 (The lower limit of oil-window temperature is ~100℃<sup>[14]</sup>)

#### 3.2 X382井

X382井复杂热传导模型的模拟结果见图3。在峰值温度小于300℃的区域内(现今埋深大于3729m),模拟结果与镜质体反射率温标较为吻合,差别小于10℃。

在角岩带(现今埋深3713~3719m),基于Barker等<sup>[15]</sup>的公式计算得到的峰值温度远低于模拟结果,而根据Bostick等<sup>[12,13]</sup>的爆炸古温度计算方法计算的结果与模拟结果较一致,可计算获得下伏烃源岩层的热演化历史。在距岩席6~16m的区域(现今埋藏深度3719~3729m),模型温

度高于孔隙水的沸点,镜质体反射率仍随温度上升而增高,但是不能可靠地计算围岩的峰值温度。

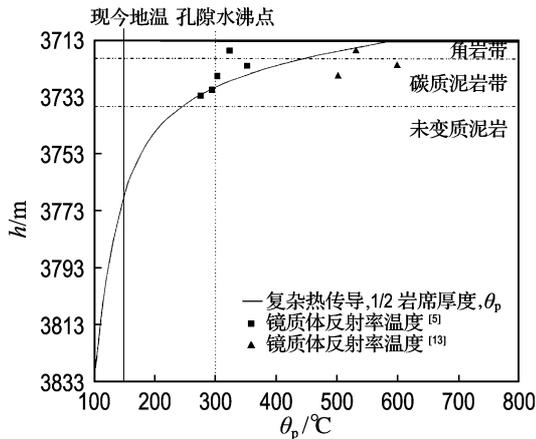


图3 X382井岩席下伏围岩的峰值温度  
(生油窗温度下限约为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>)

Fig. 3 Predicted peak temperature of the underlying host rocks at Well X382 (The lower limit of oil-window temperature is  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>)

### 3.3 X39井

X39井的复杂热传导模型的模拟结果见图4. 距岩席23 m外的地层(现今埋深大于

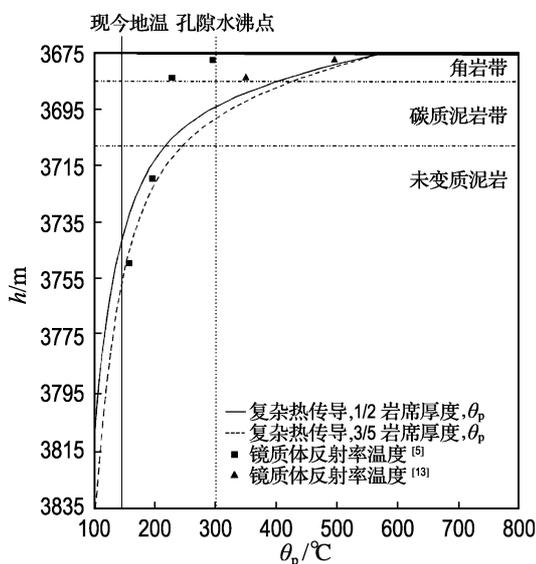


图4 X39井岩席下伏围岩的峰值温度  
(生油窗温度下限约为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>)

Fig. 4 Predicted peak temperature of the underlying host rocks at Well X39 (The lower limit of oil-window temperature is  $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[14]</sup>)

3 698 m),经历的峰值温度低于孔隙水的沸点,模拟结果与根据镜质体反射率计算的峰值温度十分吻合,相差不足  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;对于角岩带(现今埋深3 675~3 685 m),据 Bostick 等<sup>[12,13]</sup>的爆炸古温度计算方法得到的峰值温度优于文献[12]的公式计算结果,且距岩席越近,爆炸古温度计算方法越准确.自角岩带边缘到距岩席23 m处(现今埋深3 685~3 698 m)的碳质泥岩经历的峰值温度高于孔隙水沸点,镜质体反射率可能不再反映古地温。

## 4 讨论

### 4.1 汽化热对热传输的影响

X38井两种模型的对比表明,考虑孔隙水汽化热的复杂热传导模型更好地描述了实际发生的热传输过程,模拟温度与镜质体反射率分析结果相近,说明由于泥岩孔隙度较高,孔隙水汽化吸热作用不可忽略,整体上地层孔隙水的存在及其汽化大大降低了岩浆热影响的空间范围,可以有效地降低围岩峰值温度达  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,例如在距岩席底面距离0、20、40和60 m处,孔隙水的汽化使得围岩峰值温度下降101、144、122和  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.2 异常镜质体反射率的地质意义

由模拟结果可知,惠民凹陷角岩带经历的最低峰值温度约为  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但在该带测得异常低的镜质体反射率,甚至明显低于碳质泥岩带.类似现象亦有报道:Peters 等<sup>[16]</sup>认为在极高的热压作用(温度大于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,热催化产生的沥青物质被吸收进入围岩的镜质体内,导致镜质体具有异常低的反射率值;Barker 等<sup>[4]</sup>认为孔隙水处于超临界状态是近岩体岩石中镜质体反射率出现异常低值的可能原因.此外,当温度高于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,Bostick 等<sup>[12,13]</sup>的实验显示,低压条件下褐煤样本的镜质体反射率要高于高压条件,即当峰值温度高于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时镜质体反射率受压强的影响显著.尽管目前对围岩镜质体反射率出现异常低值还存在争议,但是上述各种解释都认同在近侵入体围岩处的高温(高于  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ )及其导致的高压是镜质

体反射率出现异常低值的主要条件. 由于角岩带的镜质体反射率比临近的碳质泥岩带低很多(表1), 即反射率随峰值温度升高减小, 因此无论是Barker等<sup>[4]</sup>提出的镜质体反射率与最大温度的关系公式, 还是Peters等<sup>[16]</sup>的镜质体热演化化学动力学模型(Easy% $R_o$ )都不能被用来计算该区域内的最大温度. 从本文的模拟结果来看, 角岩化带靠近岩席的区域, 当温度高于450℃时, 尽管Bostick等<sup>[12,13]</sup>的爆炸古温度计算方法在峰值温度与镜质体反射率间仅存在一种粗略的对应关系, 例如在500℃, 误差为40℃, 在600℃时误差达100℃, 但仍能指示峰值温度的变化趋势, 具有一定的意义. 但在角岩带内靠近碳质泥岩带的位置, 爆炸古温度不再反映泥岩的热演化. 压力状态和孔隙水相态可能是主要控制因素<sup>[4,14]</sup>.

碳质泥岩带中镜质体反射率高于3.0%的区域, 虽然镜质体反射率仍随温度升高而升高, 但Bostick等<sup>[12,13]</sup>的爆炸古温度计算方法以及Barker等<sup>[15]</sup>的公式都不能用来准确计算围岩的峰值温度, 镜质体反射率失去温标作用, 孔隙水的汽化或者处于超临界状态是重要的原因<sup>[8]</sup>.

## 5 结 论

(1) 地层孔隙水的汽化热可以显著影响浅侵位岩席和围岩间的热传输, 地层孔隙水的汽化作用降低了岩席对围岩热影响范围, 使得围岩的峰值温度下降100℃以上.

(2) 在热接触变质形成的角岩带出现镜质体反射率的异常值, 无法通过常用公式计算围岩经历的峰值温度. Bostick的爆炸古温度计算方法能近似地指示围岩的峰值温度, 反映了该围岩区域内的高温 and 高压环境. 该结论是否具有通用性还有待更多地质实例的检验.

**致谢:** 美国地质调查局的 N. H. Bostick 博士在镜质体反射率温标方面提供了文献和资料.

## 参 考 文 献:

[1] 李春光. 山东惠民凹陷火成岩原生油气藏[J]. 江汉

石油学院学报, 1994, 16(1):8-12

- [2] GALUSHKIN Y I. Thermal effects of igneous intrusions on maturity of organic matter: A possible mechanism of intrusion [J]. **Organic Geochemistry**, 1997, 26(11-12):645-658
- [3] 单业华, 袁 鼎, 李志安. 岩浆热变质作用数值模拟 [J]. 中国煤田地质, 1998, 10(2):19-26
- [4] BARKER C E, BONEY Y, LEWAN M D. Fluid inclusion and vitrinite-reflectance geothermometry compared to heat-flow models of maximum paleotemperature next to dikes, western onshore Gippsland Basin, Australia [J]. **International Journal of Coal Geology**, 1998, 37(1-2):73-111
- [5] WANG Da-yong, LU Xian-cai, ZHANG Xue-jun, et al. Heat-model analysis of wall rocks below a diabase sill in Huimin Sag, China - compared with thermal alteration of mudstone to carbargilite and hornfels and with increase of vitrinite reflectance [J]. **Geophysical Research Letters**, 2007, 34:doi:10.1029/2007GL030314
- [6] 王良书, 熊 振, 郭随平, 等. 利用地球物理测井资料计算油气盆地中沉积岩原地热导率[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 5(34):526-531
- [7] 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳拗陷新生代构造—热演化历史研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4):1127-1135
- [8] 樊庆真, 杨显成. 济阳拗陷深层资源潜力和有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1):8-10
- [9] 邱隆伟, 席庆福, 刘魁元. 山东沾化凹陷罗151井区隐伏辉绿岩的产状及岩相带划分[J]. 岩石学报, 2000, 16(3):413-419
- [10] 操应长, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 渤海湾盆地第三系火成岩油气藏成藏条件探讨[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(2):6-11
- [11] 张映红, 朱筱敏, 吴小洲, 等. 侵入岩及其外变质带岩相与储集层模型[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2):22-26
- [12] BOSTICK N H, PAWLEWICZ M J. Paleotemperatures based on vitrinite reflectance of shales and limestones in igneous dike aureoles in the

- upper cretaceous Pierre shale, Walsenburg, Colorado [M] // WOODWARD J, MEISNER F F, CLAYTON J L, eds. **Hydrocarbon Source Rocks of the Greater Rocky Mountain Region**. Denver: Rocky Mountain Association of Geologists, 1984;387-392
- [13] BOSTICK N H. Thermal alteration of clastic organic particles as an indicator of contact and burial metamorphism in sedimentary rocks [J]. **Geoscience and Man**, 1971, Ⅲ:83-92
- [14] OTHMAN R, AROURI K R, WARD C R, *et al.* Oil generation by igneous intrusions in the northern Gunnedah Basin, Australia [J]. **Organic Geochemistry**, 2001, 32(10):1219-1232
- [15] BARKER C E, PAWLEWICZ M J. Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures: A comparison of methods [J]. **American Chemical Society Symposium Series**, 1994, 570:216-229
- [16] PETERS K E, SIMONEIT B R T, BRENNER S, *et al.* Vitrinite reflectance-temperature determinations for intruded Cretaceous black shale in the eastern Atlantic [C] // **Symposium in Geochemistry: Low Temperature Metamorphism of Kerogen and Clay Minerals**. Los Angeles: SEPM, 1978:53-58

## Modeling study of thermal influence of diabase sill in Huimin sag on its underlying organic-rich host rocks

WANG Da-yong<sup>1</sup>, SONG Yong-chen<sup>\*1</sup>, LU Xian-cai<sup>2</sup>, ZHAO Ming-long<sup>1</sup>, QI Tian<sup>1</sup>

( 1. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory for Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China )

**Abstract:** Gas and oil reservoir related to igneous sills was found in Huimin sag, Bohai bay by exploration. The thermal evolution of an isolated intrusive diabase sill and its host rocks in this sag was numerically simulated based on two types of heat conduction models. Thermal effect of this sill on the underlying host rocks was quantitatively analyzed. Simulation results indicate that pore-water vaporization is an important factor influencing the heat transfer of intrusive magma into host rocks. In the case of pore-water volatilization, the computed peak temperature of host rocks is as high as 100 °C, lower compared with the simple heat conduction model. Anomalously low vitrinite reflectances occur in hornfels zone formed by contact metamorphism. Therefore, they can not be converted into the peak temperature based on some usual computational formulas. However, the converted peak temperature using bomb paleothermometer matches well with the prediction of one of heat conduction models. It is shown that the hornfels zone once experienced a high-temperature (above 450 °C) and high-pressure environment.

**Key words:** thermal transport model; thermal maturity; diabase sill; vitrinite reflectance; Huimin sag